第 41 卷　第 2 期
2024 年 4 月

应　用　力　学　学　报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 41 No. 2
Apr. 2024

文章编号:1000-4939(2024)02-0392-12

# 覆水峡谷-丘陵复合地貌的地震差动相干函数模型及规律特征与影响

陈欣宇[1,2],柳国环[1,2],费琦翔[1,2]

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室,300350 天津;2. 天津大学建筑工程学院,300350 天津)

**摘　要:**构建了覆水峡谷-丘陵复合地貌的地震差动模拟所需的相干函数模型。首先,提出并推导得到了考虑土体滤波效应和竖向距离的覆水峡谷-丘陵复合地貌相干函数模型表达式;探讨并阐述了相干性变化的规律特征及其物理本质。然后,基于新相干模型和传递函数构建地下功率谱矩阵,生成地下多点地震动;通过功率谱及相干函数拟合验证了模拟结果的科学性与合理性;对比分析了本研究提出的相干函数模型对多点地震动空间变异性的影响。最后,以一座连续刚构桥为例,探讨了新相干函数模型对结构地震差动响应的影响。结果表明:基于新相干函数模型的多点地震动相干性降低,各点地震动的空间变异性增大,进而加剧了结构各支承点运动的不同步性,最终导致结构地震差动响应增大。

**关键词:**峡谷-丘陵复合地貌;相干函数;多点地震动;地震响应

**中图分类号:**TU311.3　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.013

# A coherence function model for simulating multi-support seismic motions of canyon-hill composite topography and characteristics

CHEN Xinyu[1,2], LIU Guohuan[1,2], FEI Qixiang[1,2]

(1. State Key Laboratory of Intelligent Construction and Operation in Hydraulic Engineering, Tianjin University, 300350 Tianjin, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, 300350 Tianjin, China)

**Abstract:** This paper innovatively provides a coherence function model, specially adapted for water-covered canyon-hill composite topography and for simulating the multi-support seismic motions. First, a new coherence function model considering the soil filtering effect and vertical distance is proposed and derived. The characteristics of coherence and physical meaning of the proposed model are further investigated and summarized. Then, the multi-support underground seismic motions are generated by decomposing the underground power spectral density matrix, which is formed by combining the coherence function based on the derived model with the transfer function. Subsequently, the reasonability and rationality of the simulated results are verified by comparing the simulated power spectrum and the coherence function to the theoretical ones. Finally, the influence of the presented coherence function model on the differential effect

**收稿日期:**2022-12-28　　**修回日期:**2023-03-10
**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51978461)
**通信作者:**柳国环。E-mail:liugh@tju.edu.cn
**引用格式:**陈欣宇,柳国环,费琦翔. 覆水峡谷-丘陵复合地貌的地震差动相干函数模型及规律特征与影响[J]. 应用力学学报,2024,41(2):392-403.
CHEN Xinyu, LIU Guohuan, FEI Qixiang. A coherence function model for simulating multi-support seismic motions of canyon-hill composite topography and characteristics[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(2):392-403.

of multi-support seismic motions and the dynamic response of a continuous rigid frame bridge is specially analyzed, respectively. The results show that the coherence among the simulated variable seismic motions is relatively reduced, but the variability of seismic motions at each foundation is increased, which leads to the enlargement of the structural responses.

**Key words**: canyon-hill composite topography; coherence function; multi-support seismic motion; seismic response

大量研究表明场地的地形和地质条件对地震动影响显著,因而山区地震动与平原地震动在特征上表现出较大差异。周田宇等[1]利用当前较具代表性的地形效应量化表征模型,初步分析了川滇山区高频地震动的地形效应;崔臻等[2]从幅值、持时和频谱 3 个角度探讨了高山峡谷地区洞室群场址的地震动特征;王运生等[3]基于实测资料对丘陵地貌区斜坡地震动响应特征开展了研究,证实了斜坡高位放大效应,且表明坡顶的高频滤波作用更为明显。受地形效应、行波效应和部分相干效应的影响,地震动表现出明显的空间变异性,由于缺乏各类地形条件下的多点地震动实测资料,故研究考虑地形效应的多点地震动人工模拟方法对山区结构尤其是大坝、大跨桥梁和长距离输电塔等长大结构的抗震分析具有重要意义。通常多点地震动模拟需要通过目标功率谱、传递函数和相干函数构建功率谱矩阵,基于此研究框架,WU 等[4]利用水平地表到峡谷表面的传递函数模拟了 V 形峡谷表面的多点地震动,其相干函数采用了目标点的水平投影点来近似计算;LIU 等[5-6]提出了峡谷相干函数并进一步计算得到地下相干函数,利用水平地表到峡谷表面再到地下的两步传递函数法模拟了 U 形峡谷场地的地下多点地震动;柳国环等[7-10]分别获得了分层圆弧峡谷在 SH 波和 SV 波入射下的多点地震动,进而获得了 V 形峡谷的地下多点地震动,并分析了其上桥梁在超大震下的破坏模式;何颖等[11]提出了一种考虑土体非线性特性的沉积河谷多点地震动模拟方法,并以 V 形半满河谷为例验证了其合理性。

以上有关多点地震动模拟的研究,均针对单一峡谷地形,而在山区往往存在相距不远的多个峡谷,各峡谷间可视作丘陵,形成一种峡谷-丘陵复合地貌。学者们针对该类复合地貌开展了一些研究:李郑梁等[12]采用边界积分方程法得到了浅切割高山峡谷复合地貌的位移响应,并探讨了入射波类型及频率、入射角、山体和峡谷的几何参数对该复合地貌地震动放大效应的影响;张玉敏等[13]拟合了高山峡谷地区地下洞室群非平稳人工地震动,但其模拟的并非空间相关的多点地震动。故尚需发展一种峡谷-丘陵复合地貌地下多点地震动的有效模拟方法,其关键在于获得适用于该复合地貌的相干函数。在 V 形峡谷多点地震动模拟中,峡谷表面两点的相干函数采用了其水平地表投影点的相干函数近似替代,而对于峡谷-丘陵复合地貌,需考虑丘陵的滤波作用,因而现有的相干函数计算方法不再适用。LIU 等[5]提出了一种通过位移函数的傅里叶谱计算峡谷相干函数的方法,但其依赖于场地的散射理论解,且无实测资料提供依据。因此尚需发展一种基于经验相干函数模型,并需考虑峡谷-丘陵复合地貌特征的新相干函数模型。

本研究以覆水双 V 形峡谷为例,首先推导了覆水峡谷-丘陵复合地貌相干函数的显式表达式,对该相干函数模型的优势加以分析并探讨了其相干性的变化规律和物理本质;进而模拟得到了基于该相干函数模型的地下多点地震动,通过功率谱和相干函数拟合验证了所模拟地震动的谱兼容性和空间相关性;对比分析了新相干函数模型对多点地震动空间变异性的影响;最后,以一座连续刚构桥为例,探讨了新相干函数对结构差动响应的影响。本研究可为我国西南部峡谷-丘陵地貌区的多点地震动模拟和相应长大结构的抗震分析提供参考。

## 1　覆水峡谷-丘陵复合地貌相干函数

### 1.1　推导过程

场地模型如图 1 所示,要得到点 $i$ 和 $n$ 的相干函数,取位于峡谷另一侧且与点 $i$ 高度相同的点 $j$,则点 $j$ 的振动可以用具有相位差的点 $i$ 的振动来表示[5](注意到 $\tau_i = \tau_j$, $h_{wi} = h_{wj}$),即

$$j^{(\omega)}(t+\Delta\tau_1)=\frac{A^{\langle j\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}}i^{(\omega)}\left(t+\tau_i+\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K^*_{\mathrm{w}}}}h_{\mathrm{w}i}-\tau_j-\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K^*_{\mathrm{w}}}}h_{\mathrm{w}j}+\Delta\tau_2\right)=\frac{A^{\langle j\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}}i^{(\omega)}(t+\Delta\tau_2)\tag{1}$$

其中:$A$ 代表谐波运动的振幅;$\tau_i$ 和 $\tau_j$ 为常数;$\tau=k^*z/\omega=z\cdot\sqrt{\rho/G^*}$,$\rho$ 代表目标点处土壤密度,$z$ 为目标点距地表的深度,$G^*$ 和 $k^*$ 分别为复波数和复剪切模量;$\rho_{\mathrm{w}}$ 为水的密度;$K^*_{\mathrm{w}}$ 为水的复体积模量;$h_{\mathrm{w}i}$ 和 $h_{\mathrm{w}j}$ 分别为 $i$ 、$j$ 两点距覆水水面的深度。

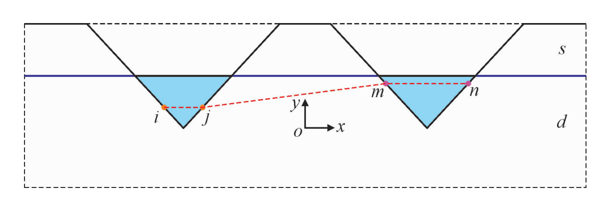



图 1　场地示意图

Fig. 1　Schematic diagram of site

根据随机振动理论,$i$ 、$j$ 两点的互相关函数可以表示为

$$R_{ij}(\Delta\tau_1)=E[i^{(\omega)}(t)j^{(\omega)}(t+\Delta\tau_1)]=\frac{A^{\langle j\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}}E[i^{(\omega)}(t)i^{(\omega)}(t+\Delta\tau_2)]=\frac{A^{\langle j\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}}R_{ii}(\Delta\tau_2)\tag{2}$$

其中 $R_{ii}(\Delta\tau_2)$ 为 $i$ 点的自相关函数。

进而 $i$ 、$j$ 两点的互功率谱密度函数可表示为

$$S_{ij}(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}R_{ij}(\Delta\tau_1)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega\Delta\tau_1}\mathrm{d}(\Delta\tau_1)=\frac{A^{\langle j\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}}\int_{-\infty}^{+\infty}R_{ii}(\Delta\tau_2)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega\Delta\tau_2}\mathrm{d}(\Delta\tau_2)=\frac{A^{\langle j\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}}S_{ii}(\omega)\tag{3}$$

由相干函数的定义,$S_{ij}(\omega)$ 还可以表示为

$$S_{ij}(\omega)=\gamma_{ij}(\omega)\sqrt{S_{ii}(\omega)S_{jj}(\omega)}\tag{4}$$

联立式(3)和(4),得到

$$\sqrt{S_{jj}(\omega)}=\frac{A^{\langle j\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}\gamma_{ij}(\omega)}\sqrt{S_{ii}(\omega)}\tag{5}$$

相似地,$m$ 、$n$ 两点间也存在如下关系,即

$$\sqrt{S_{mm}(\omega)}=\frac{A^{\langle m\rangle}_{(\omega)}\gamma_{mn}(\omega)}{A^{\langle n\rangle}_{(\omega)}}\sqrt{S_{nn}(\omega)}\tag{6}$$

假设点 $j$ 和 $m$ 间的土体为单自由度结构,地震波由点 $j$ 向 $m$ 传播,点 $j$ 处的地震动加速度 $a_j(t)$ 经过土体滤波后,得到点 $m$ 处的相对位移、速度和加速度时程分别为 $m(t)$ 、$m'(t)$ 和 $m''(t)$ ,则土体的振动方程为

$$m''(t)+2\zeta\omega_0m'(t)+\omega_0^2m(t)=-a_j(t)\tag{7}$$

式中 $\zeta$ 和 $\omega_0$ 分别为土体的阻尼比和自振频率。

对式(7)两侧进行傅里叶变换,得到相对位移、速度和加速度的傅里叶谱分别为

$$m(\omega)=\frac{-1}{-\omega^2+\mathrm{i}\cdot2\zeta\omega_0\omega+\omega_0^2}a_j(\omega)\tag{8}$$

$$m'(\omega)=\frac{-\mathrm{i}\omega}{-\omega^2+\mathrm{i}\cdot2\zeta\omega_0\omega+\omega_0^2}a_j(\omega)\tag{9}$$

$$m''(\omega)=\frac{\omega^2}{-\omega^2+\mathrm{i}\cdot2\zeta\omega_0\omega+\omega_0^2}a_j(\omega)\tag{10}$$

点 $m$ 处的绝对加速度为

$$a_m(t)=m''(t)+a_j(t)=-2\zeta\omega_0m'(t)-\omega_0^2m(t)\tag{11}$$

对式(11)两侧进行傅里叶变换得到

$$a_m(\omega)=m''(\omega)+a_j(\omega)=-2\zeta\omega_0m'(\omega)-\omega_0^2m(\omega)\tag{12}$$

将式(8)和(9)代入式(12),得到

$$a_m(\omega)=\frac{\mathrm{i}\cdot2\zeta\omega_0\omega+\omega_0^2}{-\omega^2+\mathrm{i}\cdot2\zeta\omega_0\omega+\omega_0^2}a_j(\omega)=H_{jm}(\mathrm{i}\omega)a_j(\omega)\tag{13}$$

进而,点 $j$ 和 $m$ 的自功率谱间有如下关系[14]

$$S_{mm}(\omega)=H_{jm}(\mathrm{i}\omega)H^*_{jm}(\mathrm{i}\omega)S_{jj}(\omega)\tag{14}$$

将式(5)和(6)代入式(14)得到

$$\frac{1}{\sqrt{H_{jm}(\mathrm{i}\omega)H^*_{jm}(\mathrm{i}\omega)}}=\sqrt{\frac{S_{jj}(\omega)}{S_{mm}(\omega)}}=\frac{A^{\langle n\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}}\frac{1}{H_{jm}(\mathrm{i}\omega)\gamma_{ij}(\omega)\gamma_{mn}(\omega)}\sqrt{\frac{S_{ii}(\omega)}{S_{nn}(\omega)}}\tag{15}$$

进一步整理得到

$$\frac{A^{\langle n\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}}\sqrt{\frac{S_{ii}(\omega)}{S_{nn}(\omega)}}=\sqrt{\frac{H_{jm}(\mathrm{i}\omega)}{H^*_{jm}(\mathrm{i}\omega)}}\gamma_{ij}(\omega)\gamma_{mn}(\omega)\tag{16}$$

最终 $i$ 、$n$ 两点的互功率谱密度函数可以表示为(注意到此时 $\tau_i\neq\tau_n$ ,$h_{\mathrm{w}i}\neq h_{\mathrm{w}n}$ )

$$S_{in}(\mathrm{i}\omega)=\frac{A^{\langle n\rangle}_{(\omega)}}{A^{\langle i\rangle}_{(\omega)}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega\left(\tau_n+\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K^*_{\mathrm{w}}}}h_{\mathrm{w}n}-\tau_i-\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K^*_{\mathrm{w}}}}h_{\mathrm{w}i}\right)}S_{ii}(\omega)\tag{17}$$

由式(16)和(17),可得 $i$ 、$n$ 两点相干函数为

$$\begin{aligned}&\gamma_{in}(\mathrm{i}\omega)\\&=\frac{S_{in}(\mathrm{i}\omega)}{\sqrt{S_{ii}(\omega)S_{nn}(\omega)}}\\&=\frac{A_{(\omega)}^{\langle n\rangle}}{A_{(\omega)}^{\langle i\rangle}}\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega\left(\tau_n+\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K_{\mathrm{w}}^*}}h_{\mathrm{w}n}-\tau_i-\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K_{\mathrm{w}}^*}}h_{\mathrm{w}i}\right)}\sqrt{\frac{S_{ii}(\omega)}{S_{nn}(\omega)}}\\&=\sqrt{\frac{H_{jm}(\mathrm{i}\omega)}{H_{jm}^*(\mathrm{i}\omega)}}\gamma_{ij}(\omega)\gamma_{mn}(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega\left(\tau_n+\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K_{\mathrm{w}}^*}}h_{\mathrm{w}n}-\tau_i-\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K_{\mathrm{w}}^*}}h_{\mathrm{w}i}\right)}\end{aligned}\tag{18}$$

其中 $\gamma_{ij}(\omega)$ 和 $\gamma_{mn}(\omega)$ 采用 Hao 模型计算。

式(18)即本研究提出的适用于覆水峡谷-丘陵复合地貌的地表相干函数计算方法。

在以往研究中,考虑到 P 波可在水中传播,从随机振动理论和一维波动理论出发,推导了覆水效应的地下相干函数,其具体表达式为

$$\gamma_{i'n'}(\mathrm{i}\omega)=\begin{cases}\gamma_{in}(\mathrm{i}\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega[(\tau_i-\tau_{i'})-(\tau_n-\tau_{n'})]}\\ (\text{目标点位于无覆水区})\\ \gamma_{in}(\mathrm{i}\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega\left[(\tau_i-\tau_{i'})-(\tau_n-\tau_{n'})+\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K_{\mathrm{w}}^*}}(h_{nn'}-h_{ii'})\right]}\\ (\text{目标点位于覆水区})\end{cases}\tag{19}$$

由式(18)计算得到地表点间的相干函数 $\gamma_{in}(\mathrm{i}\omega)$ 后,由式(19)即得到相应地下点间的相干函数 $\gamma_{i'n'}(\mathrm{i}\omega)$ 。

## 1.2　改进前后相干函数的对比

式(18)在峡谷部位相干函数的基础上,乘以因子 $\sqrt{H_{jm}(\mathrm{i}\omega)/H_{jm}^*(\mathrm{i}\omega)}$ 和 $\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega(\tau_n+\sqrt{\rho_{\mathrm{w}}/K_{\mathrm{w}}^*}h_{\mathrm{w}n}-\tau_i-\sqrt{\rho_{\mathrm{w}}/K_{\mathrm{w}}^*}h_{\mathrm{w}i})}$ 得到峡谷-丘陵复合地貌相干函数,其中因子 $\sqrt{H_{jm}(\mathrm{i}\omega)/H_{jm}^*(\mathrm{i}\omega)}$ 的物理意义是表征丘陵土体的滤波效应,该因子的模为 1,表明丘陵部位的土体仅影响相位,不对迟滞相干函数产生影响,该因子可以写为相位角的形式。

$$\gamma_{in}(\mathrm{i}\omega)=\exp[\mathrm{i}\theta_{jm}(\omega)]\times\gamma_{ij}(\omega)\gamma_{mn}(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega\left(\tau_n+\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K_{\mathrm{w}}^*}}h_{\mathrm{w}n}-\tau_i-\sqrt{\frac{\rho_{\mathrm{w}}}{K_{\mathrm{w}}^*}}h_{\mathrm{w}i}\right)}\tag{20}$$

其中

$$\theta_{jm}(\omega)=\arctan\frac{\mathrm{Im}[H_{jm}(\mathrm{i}\omega)]}{\mathrm{Re}[H_{jm}(\mathrm{i}\omega)]}\tag{21}$$

因子 $\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega(\tau_n+\sqrt{\rho_{\mathrm{w}}/K_{\mathrm{w}}^*}h_{\mathrm{w}n}-\tau_i-\sqrt{\rho_{\mathrm{w}}/K_{\mathrm{w}}^*}h_{\mathrm{w}i})}$ 的物理意义是表征目标点的竖向高度差对相干函数的影响。说明本研究提出的相干函数,不仅考虑了目标点间的水平距离,还计入了竖向距离的影响。

为探究改进后相干性的变化规律,选取如图 2 所示的目标点,各点坐标已在图中注明。图 3 给出了改进前后地表点 *AD*、*AC* 和 *BD* 间的相干函数,其中改进前的相干函数即由目标点的水平投影点计算,改进后的相干函数按式(18)计算。

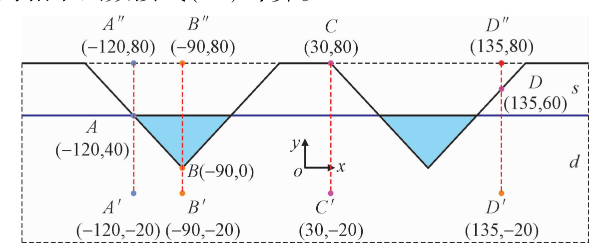



图 2　目标点示意图

Fig. 2　Schematic diagram of target points

由图 3 可知,与水平投影点计算得到的相干函数相比,本研究提出的覆水峡谷-丘陵复合地貌相干函数整体上表现出相干性减弱,但在频率很小时,本研究相干函数的相干性略有增强。其物理本质在于:在相干函数中引入竖向距离的影响后,各点地震波传播路径的差异增大,进而传播过程中地震波的幅值与相位角产生变异的概率随之增大。同时频率越高,传播过程中振动次数越多,幅值与相位角产生变异的概率也越大。当频率很小时,竖向距离对相干性的影响可以忽略,此时相干性反而略有增强。

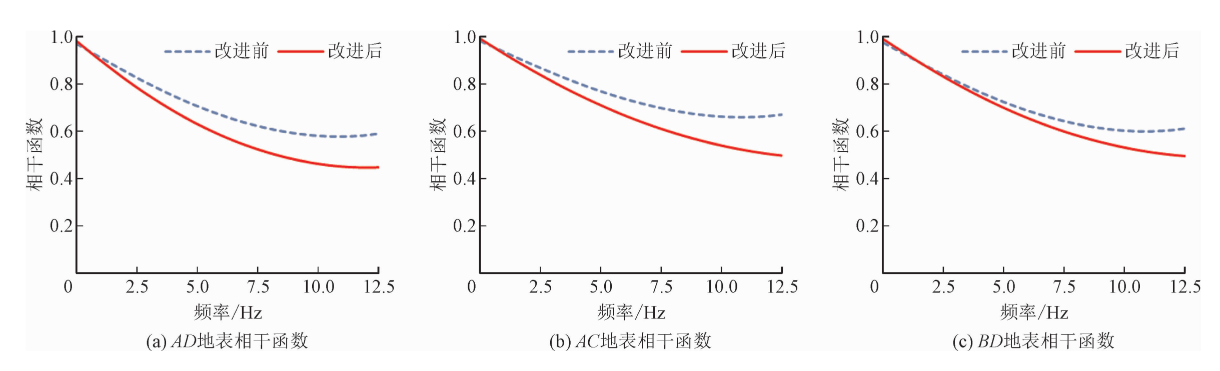



图 3　改进前后相干性的变化

Fig. 3　Comparison of coherence before and after improvement

## 2 覆水峡谷-丘陵复合地貌多点地震动模拟

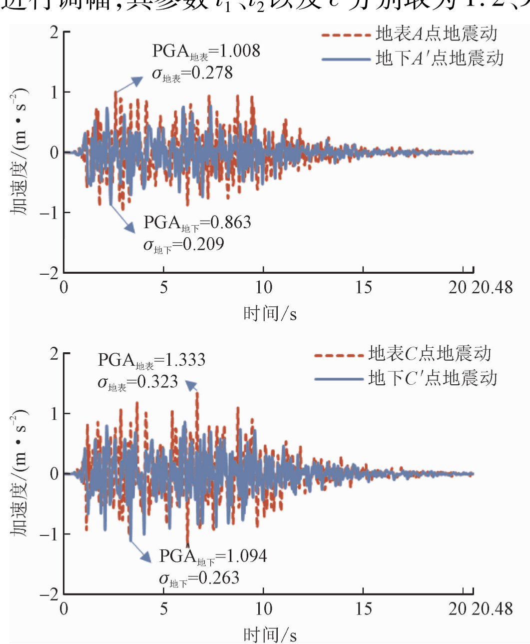
### 2.1 基于本研究模型的多点地震动模拟

依据地震动模拟理论,模拟了覆水峡谷-丘陵复合地貌的多点地震动,目标点的位置及坐标见图 2。地震动持时取为 20.48 s,选取 Clough-Penzien 功率谱模型[14]作为水平地表的目标功率谱,其参数取为 $S_0=0.006\,9$,$\omega_g=5\pi$ rad/s,$\omega_f=0.1\omega_g$,$\xi_g=\xi_f=0.6$。Hao 相干模型[15]参数采用 SMART-1 台阵 45 条地震记录的统计参数[14],其值 $\beta_1$、$a$、$b$ 和 $c$ 分别取为 $1.109\times10^{-4}$、$3.853\times10^{-3}$、$-1.811\times10^{-5}$ 和 $1.177\times10^{-4}$。选取 Jennings 包络函数[14]对生成的地震动进行调幅,其参数 $t_1$、$t_2$ 以及 $c$ 分别取为 1.2、9 和 0.155。V 形峡谷半覆水,水的体积模量取 $2.2\times10^9$ Pa,密度取 1 000 kg/m$^3$,土体物理参数见表 1。图 4 给出了各目标点的模拟加速度时程,图中标注的 PGA 代表加速度峰值,$\sigma$ 代表所模拟加速度时程的标准差。结果表明,各地下目标点的标准差均小于相应的地表目标点,这是由土体的滤波作用和放大效应导致的。此外,峡谷地形表现出了明显的放大效应,接近谷顶的 $C$、$D$ 两点地震动大于接近谷底的 $A$、$B$ 两点。

**表 1 各层土体物理参数**

Tab. 1 Physical parameters of soil

| 层 | 密度 $\rho$/(kg · m$^{-3}$) | 剪切模量 $G$/MPa | 阻尼比 $\zeta$ |
| --- | --- | --- | --- |
| $s$ | 2 500 | 380 | 0.05 |
| $d$ | 2 650 | 320 | 0.05 |



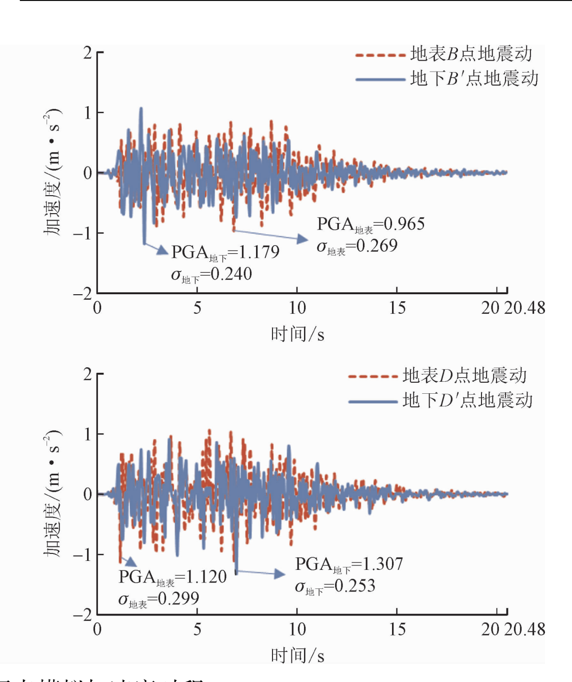



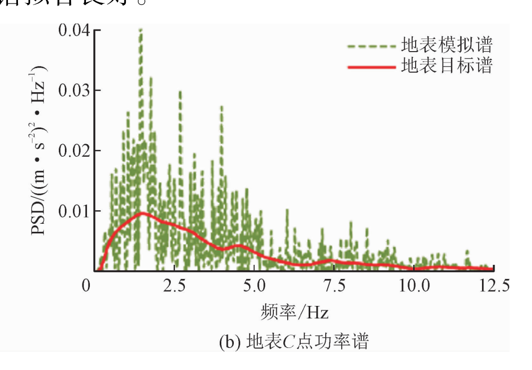

图 4 地表及地下目标点模拟加速度时程

Fig. 4 Ground and underground acceleration time histories of target points

### 2.2 功率谱及相干函数拟合

图 5 给出了各点加速度时程的频谱与目标功率谱的对比,限于篇幅,仅以点 $B(B')$ 和 $C(C')$ 为例。结果表明,所模拟加速度时程的功率谱与目标功率谱拟合良好。

(a) 地表B点功率谱




(b) 地表C点功率谱

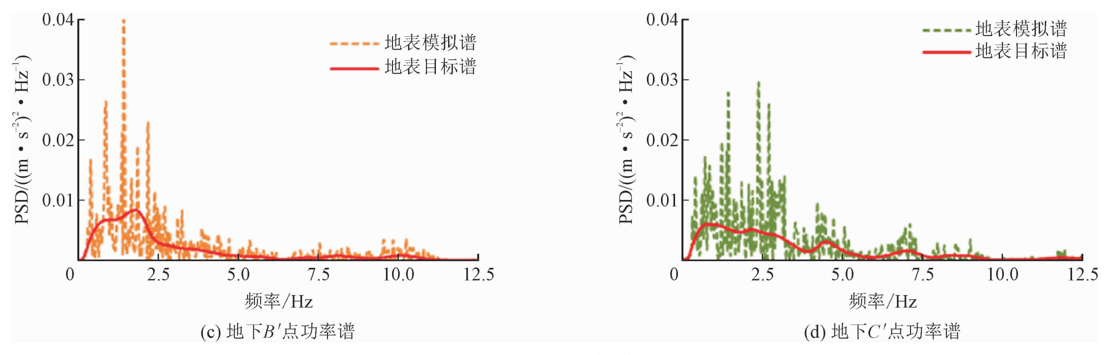



图 5　目标点功率谱拟合

Fig. 5　PSD fitting of simulated results with target PSD

图 6 给出了相干函数的拟合情况,限于篇幅,以 $AB$、$A'B'$、$BD$ 和 $B'D'$ 间的相干函数为例。结果表明,尽管相干函数的模拟值出现了一定程度的波动,但总体上模拟值仍围绕目标值变化,故所模拟地震动表现出了良好的空间相关性,证明了本研究所模拟地震动的科学性与合理性。

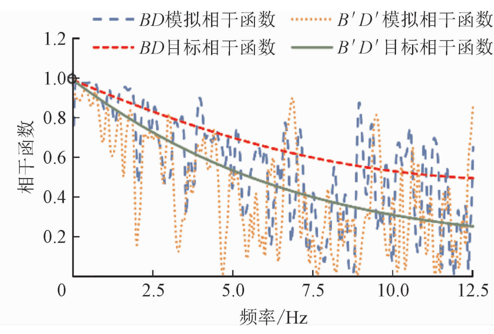
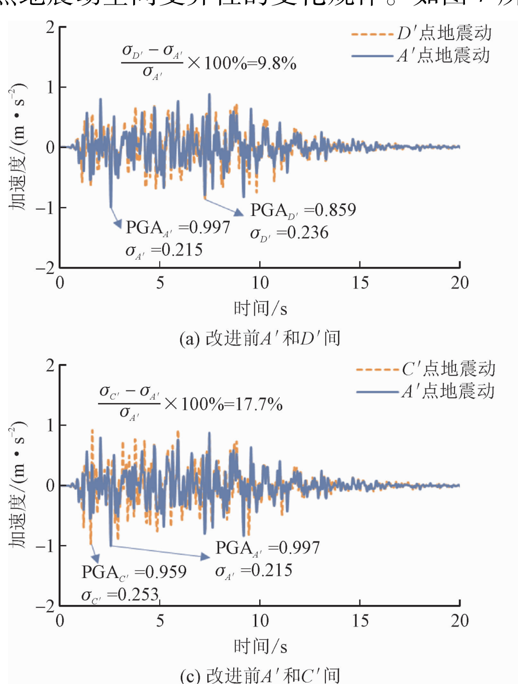


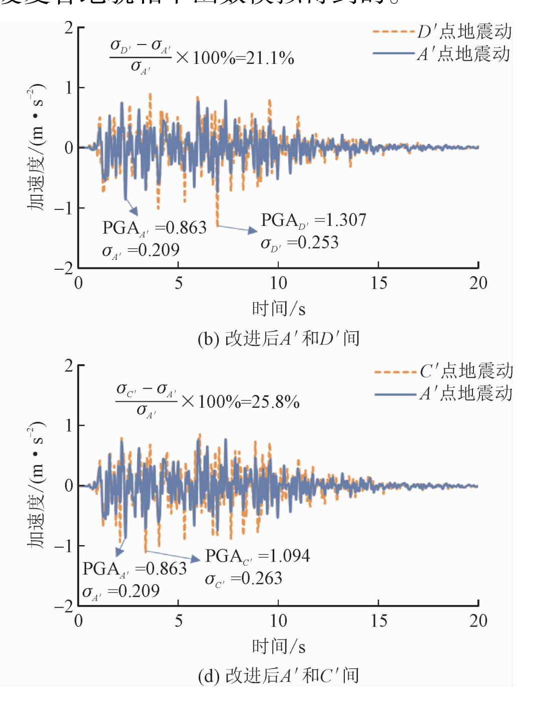

图 6　地表及地下相干函数拟合

Fig. 6　Fitting of ground and underground coherence functions

## 2.3　改进前后地下各点地震动的差值对比

各点地震动的空间变异性引起差动效应是多点地震输入与一致输入的核心区别,故有必要研究改进后多点地震动空间变异性的变化规律。如图 7 所示,左右两侧分别给出了改进前后点 $A'$ 和 $D'$、$A'$ 和 $C'$ 以及 $B'$ 和 $D'$ 间地震动差值的对比,其中改进前的地震动是采用目标点水平投影点的相干函数模拟得到的;改进后的地震动是采用本研究提出的峡谷-丘陵复合地貌相干函数模拟得到的。



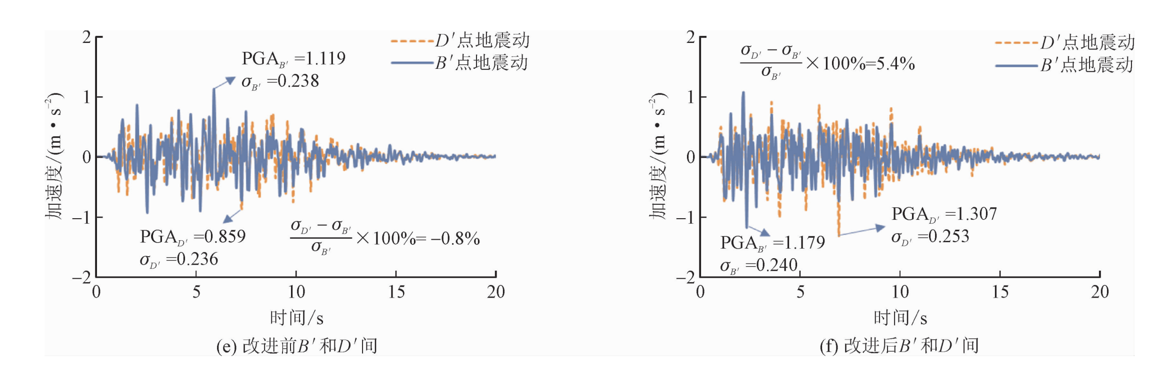



图 7 改进前后各点地震动差值的对比

Fig. 7 Comparison of seismic motion variability based on before-and-after improvement model

由图 7 可知,本研究提出的相干函数增大了各点地震动的幅值差异,进而加剧了多点地震动的空间变异性。改进前点 $A'$ 和 $D'$、$A'$ 和 $C'$ 以及 $B'$ 和 $D'$ 的地震动标准差分别相差 9.8%、17.7% 和 0.8%,改进后这一数值变为 21.1%、25.8% 和 5.4%。其原因在于,地震动可以看作一系列谐波运动的叠加,本研究提出的相干函数考虑竖向距离,谐波传播路径差异增大,相干性降低,两点同频谐波分量的幅值和相位角差异增大,最终导致两点地震动幅值和标准差的差异增大。

# 3 算例分析

本章以一座连续刚构桥为例,探究峡谷-丘陵复合地貌相干函数对多点地震动进而对结构差动响应的影响。为了独立考察单一因素(地震动)不同输入对结构反应的影响,从而充分体现以上研究的必要性和重要性,由此必须避免材料进入塑性这一影响因素对结构反应产生影响的混淆。因此,本研究对结构只进行弹性时程分析。

## 3.1 工程概况与有限元模型

如图 8 所示,某 5 跨钢筋混凝土连续刚构桥跨越峡谷-丘陵复合地貌,半覆水 V 形峡谷宽 120 m,深 80 m,土体物理参数在图 8 中注明。刚构桥全长 300 m,跨径组合为 35 m + 75 m + 80 m + 75 m + 35 m,采用变截面箱梁,箱梁顶部设 2% 的单向横坡,墩顶及跨中截面尺寸见图 9。1 号和 4 号墩高 38 m,墩底埋深 21 m,2 号和 3 号墩高 19 m,墩底埋深 17 m,桥墩采用 8.5 m × 4 m 矩形断面。混凝土采用 C50,纵筋和箍筋均采用 HRB400。

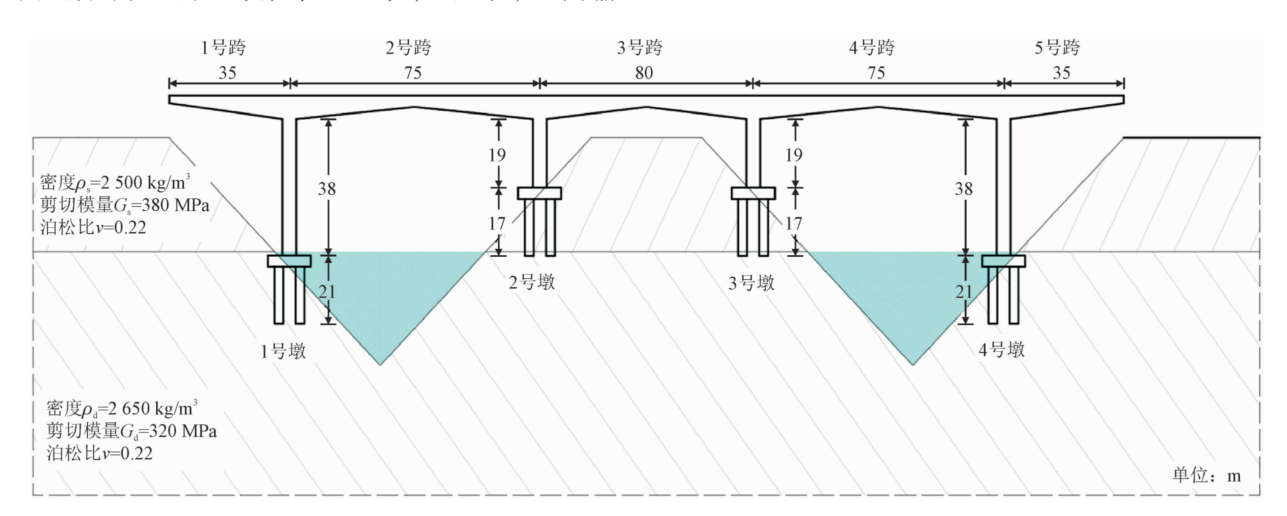



图 8 某连续刚构桥立面图

Fig. 8 Elevation of a continuous rigid frame bridge

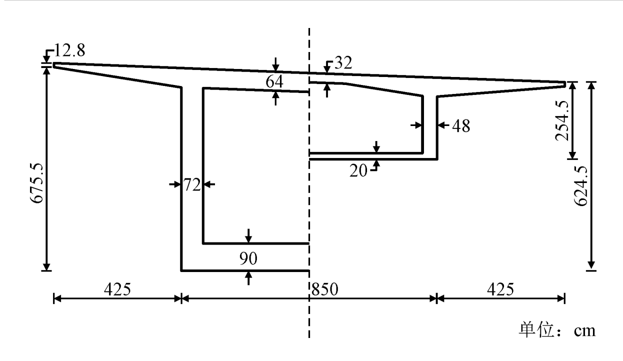



图 9　主梁墩顶(左)及跨中(右)截面

Fig. 9　Section of beam at pier top (left) and midspan (right)

采用 ABAQUS 有限元软件建立了桥梁的数值计算模型,如图 10 和 11 所示。混凝土结构和土体均采用 C3D8I 实体单元,共 21 692 个;钢筋采用 T3D2 桁架单元,共 7 792 个。墩梁绑定约束,钢筋嵌入混凝土,由于本研究不关注桩土相互作用,桩土采用共节点简化处理。梁体两侧只施加竖向位移约束及绕桥向转动约束(U3 = UR1 = UR2 = 0),在所截取地基的底边界和侧边界施加接地的弹簧和阻尼器以建立黏弹性人工边界,模拟地基的辐射阻尼。黏弹性人工边界的刚度系数和阻尼系数按文献[16]计算。

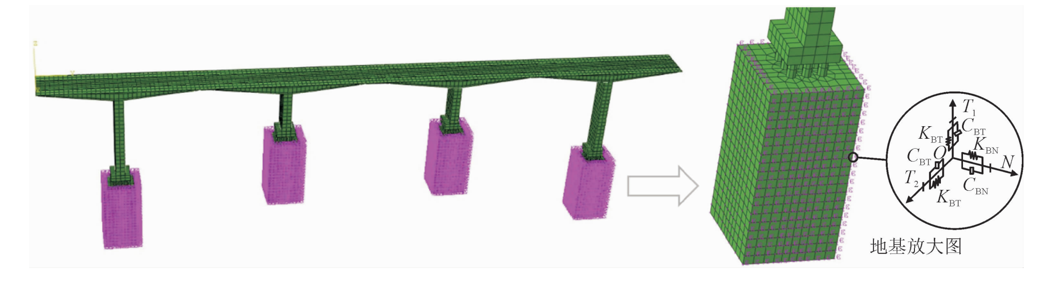



图 10　桥梁有限元模型

Fig. 10　Finite element model of bridge

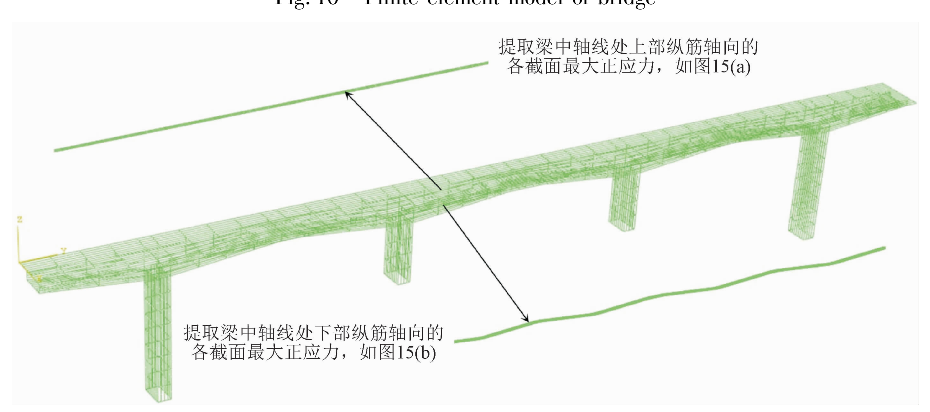



图 11　钢筋骨架有限元模型

Fig. 11　Finite element model of reinforcement skeleton

## 3.2　本研究提出的相干函数对结构响应的影响

为进一步探究本研究提出的覆水峡谷-丘陵复合地貌相干函数对结构响应的影响,分别采用改进前的相干函数和本研究提出的相干函数模拟了各桥墩支承点的地下多点地震动,如图 12 所示,计算并对比了两组地震动激励下刚构桥的动力响应。选取 2、3 和 4 号跨的跨中和两端,以及 1、3 两桥墩的墩顶和墩底作为观测点。输入前首先对各组地震动进行归一化处理,即对每一组地震动数据除以该组数据中的最大值,再对归一化后的数据分别按加速度峰值为 0.2$g$ 和 0.4$g$ 进行输入($g$ 为重力加速度)。所模拟地震动入射角为 30°,将其分解为顺桥向和竖向输入。参照文献[17]将地震动转化为直接作用于边界节点上的等效荷载来实现波动输入。

表 2 给出了改进前后刚构桥各观测点最大内力的对比。表 3 给出了改进前后各观测点最大位移的对比,图 13 和 14 分别为改进前后 0.2$g$ 地震动峰值下 1 号桥墩底部和顶部的顺桥向位移时程和加速度时程的对比。结果表明,使用峡谷-丘陵复合地貌相干函数后,本研究刚构桥的差动响应普遍增大,一方面是由于改进后 2、3 号桥墩处地震动显著增大,另一方面是由于各点地震动的空间变异性增强,加剧了各支承点运动的不同步性。图 12 中改进前后的地震动最大仅相差 8.3% (2 号桥墩处),而结构响应的最大增幅达到了 118.3% (0.4$g$ 峰值激励下 3 号

跨跨中竖向位移),由此表明,多点输入时结构差动反应对本研究相干函数模型的敏感性更强,采用改进前的相干函数将低估结构响应。

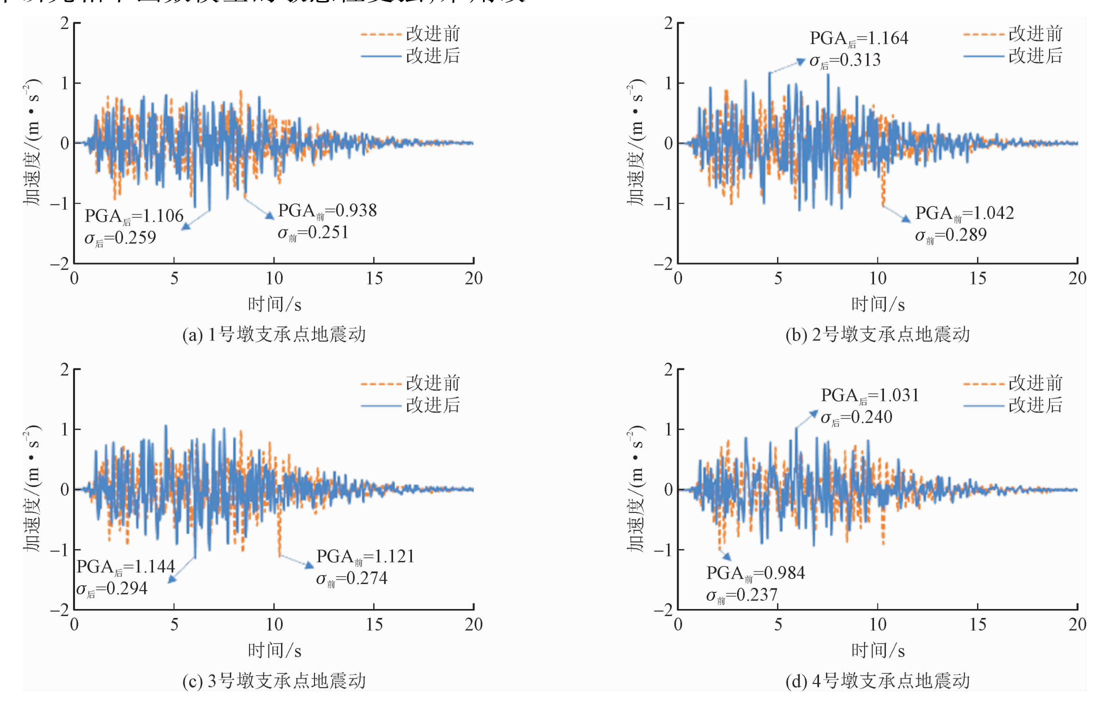



图 12 改进前后输入的多点地震动

Fig. 12 Multi-support seismic excitations based on before-and-after improvement model

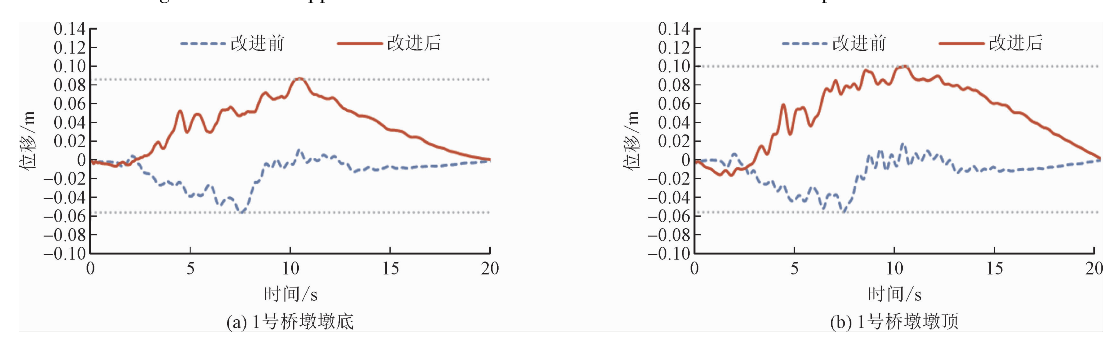



图 13 顺桥向位移时程对比

Fig. 13 Comparison of along-bridge displacement time history

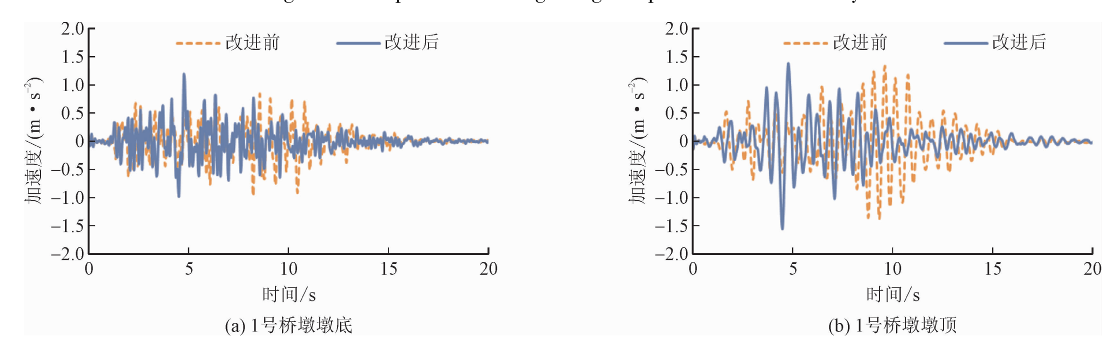



图 14 顺桥向加速度时程对比

Fig. 14 Comparison of along-bridge acceleration time history

图 15 给出了改进前后 $0.2g$ 地震动峰值下沿梁内纵筋轴向的各截面最大正应力对比,所提取钢筋的位置在图 11 中注明。图 16 和 17 分别给出了改进前后 $0.2g$ 地震动峰值下的墩底剪力时程对比和沿桥墩高度的最大剪力对比,限于篇幅,仅以 2 号和 3 号桥墩为例。结果表明,使用本研究提出的相干

函数模型后,2 号跨和 3 号跨处的钢筋截面最大正应力以及桥墩的最大剪力显著增大,进一步证明了本研究提出的覆水峡谷-丘陵复合地貌相干函数对实际工程具有不可忽视的意义。

**表 2　改进前后的最大内力对比**

Tab. 2　Comparison between maximum internal force obtained from before-and-after improvement model

| 观测点 | 0.2$g$ | | | | | | 0.4$g$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 剪力/($10^2$kN) | | $\frac{F_1-F_0}{F_0}$/% | 弯矩/($10^2$kN · m) | | $\frac{M_1-M_0}{M_0}$/% | 剪力/($10^2$kN) | | $\frac{F_1-F_0}{F_0}$/% | 弯矩/($10^2$kN · m) | | $\frac{M_1-M_0}{M_0}$/% |
| | $F_0$ | $F_1$ | | $M_0$ | $M_1$ | | $F_0$ | $F_1$ | | $M_0$ | $M_1$ | |
| 2 跨左端 | 240.7 | 357.1 | 48.4 | | | | 386.7 | 810.5 | 109.6 | | | |
| 2 跨右端 | 394.4 | 635.7 | 61.2 | | | | 607.5 | 1091.9 | 79.7 | | | |
| 3 跨左端 | 332.7 | 543.9 | 63.5 | | | | 521.0 | 944.3 | 81.2 | | | |
| 3 跨右端 | 335.6 | 363.8 | 8.4 | | | | 526.8 | 656.1 | 24.5 | | | |
| 4 跨左端 | 241.3 | 341.9 | 41.7 | | | | 621.4 | 652.8 | 5.1 | | | |
| 4 跨右端 | 501.2 | 276.3 | -44.9 | | | | 908.1 | 457.6 | -49.6 | | | |
| 2 跨跨中 | | | | 2 858.7 | 2 882.7 | 0.8 | | | | 4 965.0 | 4 758.6 | -4.2 |
| 3 跨跨中 | | | | 1 513.6 | 2 207.4 | 45.8 | | | | 2 933.8 | 4 501.4 | 53.4 |
| 4 跨跨中 | | | | 2 349.8 | 1 807.8 | -23.1 | | | | 4 682.3 | 3 739.1 | -20.1 |
| 1 墩顶部 | 243.8 | 391.0 | 60.4 | 10 535.6 | 15 502.9 | 47.1 | 442.4 | 827.2 | 87.0 | 19 181.0 | 32 905.2 | 71.6 |
| 1 墩底部 | 258.5 | 399.0 | 54.4 | 1 090.6 | 730.0 | -33.1 | 471.7 | 843.7 | 78.9 | 2 006.2 | 1 630.4 | -18.7 |
| 3 墩顶部 | 278.1 | 344.4 | 23.8 | 7 208.7 | 8 166.2 | 13.3 | 578.5 | 687.8 | 18.9 | 15 022.7 | 15 728.1 | 4.7 |
| 3 墩底部 | 292.2 | 352.6 | 20.7 | 1 798.9 | 2 427.8 | 35.0 | 606.7 | 693.3 | 14.3 | 3 781.1 | 4 668.0 | 23.5 |

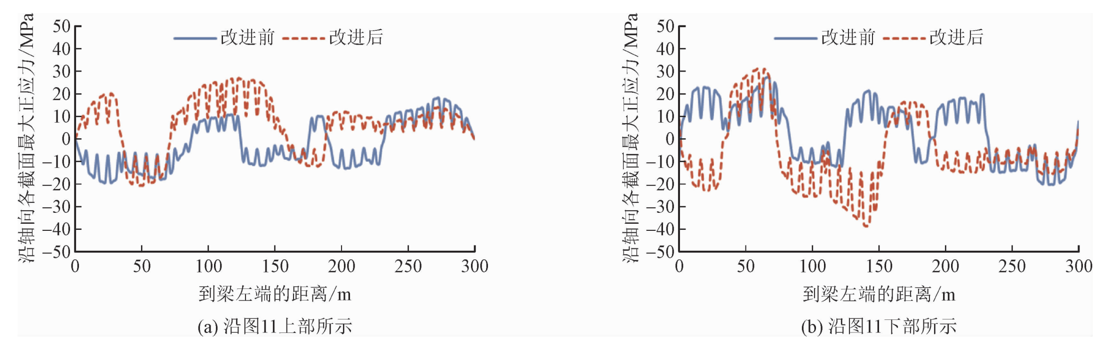
注:$F_0$代表改进前的剪力;$F_1$代表改进后的剪力;$M_0$代表改进前的弯矩;$M_1$代表改进后的弯矩。

**表 3　改进前后的最大位移对比**

Tab. 3　Comparison between maximum displacement obtained from before-and-after improvement model

| 观测点 | 0.2$g$ | | | | | | 0.4$g$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 顺桥向位移/m | | $\frac{Y_1-Y_0}{Y_0}$/% | 竖向位移/m | | $\frac{Z_1-Z_0}{Z_0}$/% | 顺桥向位移/m | | $\frac{Y_1-Y_0}{Y_0}$/% | 竖向位移/m | | $\frac{Z_1-Z_0}{Z_0}$/% |
| | $Y_0$ | $Y_1$ | | $Z_0$ | $Z_1$ | | $Y_0$ | $Y_1$ | | $Z_0$ | $Z_1$ | |
| 2 跨跨中 | 0.048 | 0.087 | 81.3 | 0.122 | 0.155 | 27.0 | 0.095 | 0.174 | 83.2 | 0.221 | 0.331 | 49.8 |
| 3 跨跨中 | 0.047 | 0.092 | 95.7 | 0.096 | 0.183 | 90.6 | 0.095 | 0.185 | 94.7 | 0.175 | 0.382 | 118.3 |
| 4 跨跨中 | 0.048 | 0.091 | 89.6 | 0.081 | 0.118 | 45.7 | 0.096 | 0.182 | 89.6 | 0.141 | 0.258 | 83.0 |
| 1 墩顶部 | 0.057 | 0.100 | 75.4 | 0.087 | 0.090 | 3.4 | 0.112 | 0.202 | 80.4 | 0.160 | 0.195 | 21.9 |
| 1 墩底部 | 0.057 | 0.086 | 50.9 | 0.087 | 0.091 | 4.6 | 0.112 | 0.174 | 55.4 | 0.160 | 0.196 | 22.5 |
| 3 墩顶部 | 0.045 | 0.086 | 91.1 | 0.087 | 0.149 | 71.3 | 0.090 | 0.172 | 91.1 | 0.157 | 0.314 | 100.0 |
| 3 墩底部 | 0.042 | 0.085 | 102.4 | 0.087 | 0.149 | 71.3 | 0.084 | 0.170 | 102.4 | 0.157 | 0.314 | 100.0 |

注:$Y_0$代表改进前顺桥向位移;$Y_1$代表改进后顺桥向位移;$Z_0$代表改进前的竖向位移;$Z_1$代表改进后的竖向位移。




(a) 沿图11上部所示　(b) 沿图11下部所示

图 15　沿纵筋轴向的各截面最大正应力对比

Fig. 15　Comparison of maximum normal stress along the longitudinal reinforcement

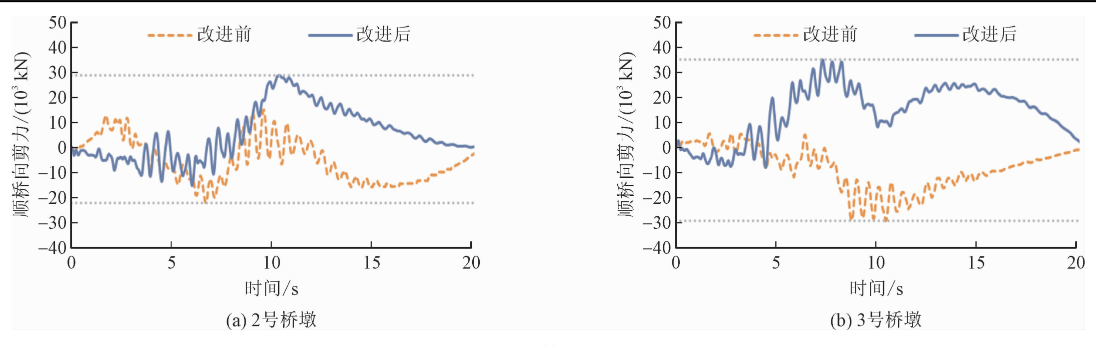



图16　墩底剪力时程对比

Fig. 16　Comparison of pier-bottom shear time history

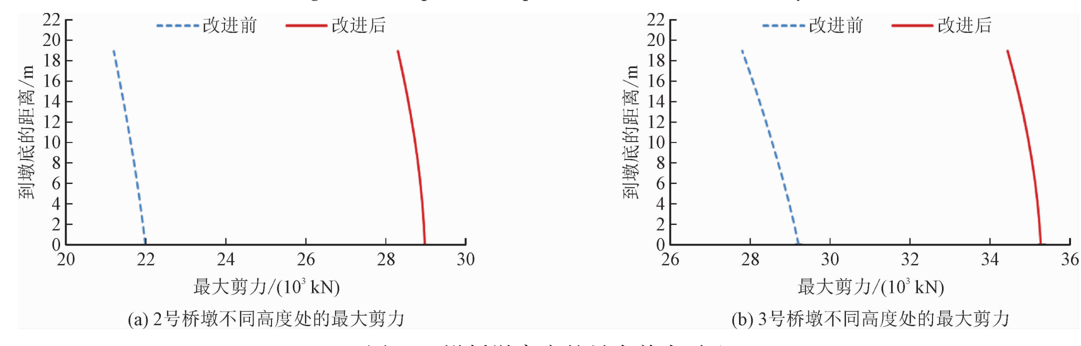



图17　沿桥墩高度的最大剪力对比

Fig. 17　Comparison of maximum shear along the piers

## 4　结　论

覆水峡谷-丘陵地貌地震动的合理输入,是开展坐落于此类地形长大工程抗震研究的基本前提。本研究针对此研究空白与现实需求,围绕相干函数模型的建立、模型自身特征和对地震动影响,以及对结构地震反应的影响等三方面,依次开展研究。具体得出如下结论。

1)提出并推导得到了覆水峡谷-丘陵复合地貌相干函数的表达式,同时引入了丘陵土体的滤波效应和竖向距离对相干性的影响。与改进前模型相比,相干性偏低,原因在于竖向距离增加了传播路径的差异,进而幅值和相位角发生变异概率增加。

2)编制程序模拟了基于本研究模型的峡谷-丘陵复合地貌地下多点地震动,验证了其合理性,对比结果发现:改进后不同目标点间地震动标准差间的差值增大,表明基于本研究相干函数的各点地震动的空间变异性明显增强。

3)为进一步表明本研究意义,对一刚构桥地震反应进行分析对比,结果表明:基于本研究模型的地震动输入下的结构地震差动反应也明显增大,说明若忽略复合地形地貌对相干函数影响,会错估甚至低估结构地震反应,从而导致安全隐患。

## 参考文献:

[1]　周田宇,梁富源,马完君,等.川滇区域高频地震动地形效应初探[J].世界地震工程,2022,38(4):26-35.
ZHOU Tianyu, LIANG Fuyuan, MA Wanjun, et al. Primary investigation topography effects on high frequency seismic ground motion in Chuan-Dian region[J]. World earthquake engineering, 2022, 38(4):26-35(in Chinese).

[2]　崔臻,盛谦,刘加进,等.高山峡谷地区洞室群工程区域地下地震动参数研究[J].防灾减灾工程学报,2013,33(3):275-281.
CUI Zhen, SHENG Qian, LIU Jiajin, et al. A study on sub-ground motion parameters for engineering site of underground houses in alpine gorge area[J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2013, 33(3):275-281(in Chinese).

[3]　王运生,明伟庭,刘江伟,等.丘陵地貌区斜坡强震动响应特征——以四川省长宁县为例[J].地球科学与环境学报,2020,42(4):540-551.
WANG Yunsheng, MING Weiting, LIU Jiangwei, et al. Characteristics of slope seismic response under strong earthquake in hilly morphologic area—the case of Changning county in Sichuan province, China[J]. Journal of earth sciences and environment, 2020, 42(4):540-551(in Chinese).

[4]　WU Y X, GAO Y F, ZHANG N, et al. Simulation of spatially varying ground motions in V-shaped symmetric canyons[J]. Journal of earthquake engineering, 2016, 20(6):992-1010.

[5] LIU G H,FENG X,LIAN J J,et al. Simulation of spatially variable seismic underground motions in U-shaped canyons[J]. Journal of earthquake engineering,2019,23(3):463-486.

[6] LIU G H, FENG X. Spatially variable seismic motions by a U-shaped canyon in a multi-layered half-space[J]. Journal of earthquake engineering,2021,25(11):2178-2201.

[7] 柳国环,马杰,冯啸. 多水平成层的非均匀介质圆弧形峡谷地下多点地震动模拟[J]. 计算力学学报,2018,35(4):473-479.
LIU Guohuan,MA Jie,FENG Xiao. Simulation of spatially variable underground seismic motions in circular-arc canyons with horizontally-layered inhomogeneous medium[J]. Chinese journal of computational mechanics,2018,35(4):473-479(in Chinese).

[8] 柳国环,江大来,刘中宪,等. 分层圆弧峡谷 SV 波地震差动模拟理论与桥梁破坏模式[J]. 中国公路学报,2021,34(11):129-141.
LIU Guohuan,JIANG Dalai,LIU Zhongxian,et al. Theory of SV-wave multi-support seismic excitations by a layered circular-arc canyon and study on the damage mode of bridge[J]. China journal of highway and transport,2021,34(11):129-141(in Chinese).

[9] 柳国环,冯啸. 跨越 V 形峡谷的桥梁抗震分析:多水平成层非均匀介质 V 形场地多点地震动模拟[J]. 中国公路学报,2017,30(12):150-158.
LIU Guohuan,FENG Xiao. Analysis of seismic response for bridges located on a V-shaped canyon:simulation of multi-support seismic motions in a V-shaped canyon with inhomogeneous multi-layer topography[J]. China journal of highway and transport,2017,30(12):150-158(in Chinese).

[10] 柳国环,冯啸,江大来. 跨越 V 形峡谷桥梁多层介质效应的多点激励破坏模式[J]. 中国公路学报,2019,32(8):101-113.
LIU Guohuan,FENG Xiao,JIANG Dalai. Failure mode of bridges under multi-support excitation in a V-shaped canyon with multi-layer topography[J]. China journal of highway and transport,2019,32(8):101-113(in Chinese).

[11] 何颖,丁晓凡,刘中宪,等. 考虑沉积河谷非线性放大效应的空间相关多点地震动模拟[J]. 工程力学,2023,40(10):99-111.
HE Ying,DING Xiaofan,LIU Zhongxian,et al. Spatial correlated multi-point ground motion simulation in sedimentary valley considering soil non-linearity[J]. Engineering mechanics,2023,40(10):99-111(in Chinese).

[12] 李郑梁,李建春,刘波,等. 浅切割的高山峡谷复杂地形的地震动放大效应研究[J]. 工程地质学报,2021,29(1):137-150.
LI Zhengliang,LI Jianchun,LIU Bo,et al. Seismic motion amplification effect of shallow-cutting hill-canyon composite topography[J]. Journal of engineering geology,2021,29(1):137-150(in Chinese).

[13] 张玉敏,盛谦,张勇慧,等. 高山峡谷地区大型地下洞室群非平稳人工地震动拟合[J]. 岩土力学,2009,30(增刊1):41-46.
ZHANG Yumin,SHENG Qian,ZHANG Yonghui,et al. Artificial simulation of nonstationary artificial seismic motion for large-scale underground cavern group located in alpine gorge area[J]. Rock and soil mechanics,2009,30(S1):41-46(in Chinese).

[14] 杨庆山,田玉基. 地震地面运动及其人工合成[M]. 北京:科学出版社,2014.

[15] HAO H,OLIVEIRA C S,PENZIEN J. Multiple-station ground motion processing and simulation based on smart-1 array data[J]. Nuclear engineering and design,1989,111(3):293-310.

[16] 谷音,刘晶波,杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学,2007,24(12):31-37.
GU Yin,LIU Jingbo,DU Yixin. 3D consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element[J]. Engineering mechanics,2007,24(12):31-37(in Chinese).

[17] 何建涛,马怀发,张伯艳,等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J]. 水利学报,2010,41(8):960-969.
HE Jiantao,MA Huaifa,ZHANG Boyan,et al. Method and realization of seismic motion input of viscous-spring boundary[J]. Journal of hydraulic engineering,2010,41(8):960-969(in Chinese).


(编辑　李坤璐)